



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# ROLE MATERIÁLOVÝCH VĚD PŘI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY TECHNICKÝCH HAVÁRIÍ

THE ROLE OF MATERIAL SCIENCES IN SOLVING THE PROBLEMS TECHNICAL ACCIDENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MIROSLAV TONKOVIČ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LENKA KLAČURKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Miroslav Tonkovič

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Role materiálových věd při řešení problematiky technických havárií**

v anglickém jazyce:

### **The role of material sciences in solving the problems technical accidents**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Komplexní znalost materiálových charakteristik - mechanických vlastností, struktury materiálu, mezních stavů, způsob výroby materiálu i znalost prováděných technologických pochodů, je zcela nezbytná při posuzování a objasňování příčin veškerých poškození i havárií jak jednotlivých součástí, tak i rozsáhlých konstrukčních celků.

Cíle bakalářské práce:

- Seznámit studenta se základními principy tvorby vysokoškolských kvalifikačních prací na odpovídající technické úrovni.
- Posouzení role materiálových věd při objasňování technických havárií

Seznam odborné literatury:

1. M. Kačor: Osudové okamžiky, Rybka Publishers, 2003.
2. M. Vašek: Havárie, poruchy a rekonstrukce, Grada.
3. M. Lorenc, S. Rogl: Zrušená křídla, Votobia, 1999.
4. <http://natgeotv.com/uk/seconds-from-disaster>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lenka Klakurková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt:**

Materiálové vědy hrají při objasňování nejrůznějších technických havárií nezastupitelnou úlohu. Práce je zaměřena na několik konkrétních vybraných technických havárií, při jejichž řešení bylo nutné využít znalosti z oblasti materiálových věd. U konkrétních případů havárií je uveden popis událostí včetně jednotlivých výsledků z probíhajícího vyšetřování. Sledované havárie jsou popsány vždy společně s potřebným teoretickým základem souvisejícím s konkrétní problematikou, jehož znalost byla při vyšetřování nehody bezpochyby nutná. Závěr práce je věnován shrnutí nejčastějších příčin havárií.

## **Abstract:**

Material sciences plays an irreplaceable role in explanation of various technical accidents. The proposed work focuses on examples of sever chosen technical accidents in which the knowledge of materials science was crucial in use and help to solve them. Description of an incident is stated to particular cases as well as results of these investigations, taking in mind the given topics of proposed work. The accidents are always described with necessary theoretical basis connected to each particular issue. Its knowledge was undoubtedly essential in solving the accident. The end of the work is a summary of the most frequent causes of technical accidents.

## **Klíčová slova:**

Materiálové vědy, havárie, únava materiálu, trhлина, martenzitická transformace, tepelné ovlivnění, tvrdost materiálu

## **Keywords:**

Material sciences, accident, fatigue, crack, martensite transformation, thermal influence, hardness

## **Bibliografická citace:**

TONKOVIČ, M. *Role materiálových věd při řešení problematiky technických havárií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Klakurková, Ph.D.

## **Prohlášení:**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 25. 5. 2012

.....  
Miroslav Tonkovič

## **Poděkování:**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval Ing. Lence Klakurkové, Ph.D. za její náměty, cenné rady a také trpělivý a obětavý přístup při vedení mé bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině a mým blízkým za podporu při psaní této práce.



# Obsah

<b>1. Úvod</b>	11
<b>2. Železniční neštěstí v Eschede</b>	12
2.1 Popis událostí	12
2.2 Příčiny nehody	13
<b>3. Destrukce vrtule letounu Embraer EMB-120RT u Atlanty</b>	14
3.1 Popis událostí	14
3.2 Co přineslo vyšetřování	15
<b>4. Explosivní dekomprese Boeingu 737 nad Havajskými ostrovy</b>	15
4.1 Popis událostí	15
4.2 Co přineslo vyšetřování	16
<b>5. Únava materiálu</b>	17
5.1 Základní údaje	18
5.2 Stádia únavového procesu	18
5.3 Únava materiálu vzhledem k druhu konstrukce	20
5.4 Únava materiálu v korozním prostředí	21
<b>6. Šíření trhlin v materiálu</b>	21
<b>7. Pád vrtulového letounu Convair CV-580 do Severního moře</b>	22
7.1 Popis událostí	22
7.2 Co přineslo vyšetřování	23
7.3 Výsledky zkoumání šroubů	24
<b>8. Požár seníku v Soběrazi u Jičína</b>	25
8.1 Popis událostí	25
8.2 Co přineslo vyšetřování	25
8.3 Martenzitická transformace	26
8.4 Důsledky tepelného ovlivnění	28
<b>9. Závěr</b>	30
<b>10. Seznam použitých zdrojů</b>	31
<b>11. Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	33



# 1. Úvod

Ne nadarmo se říká, že nehoda není náhoda a toto pořekadlo víceméně platí i pro havárie technického charakteru. Ať už se jedná o havárie, kde jsou pouze menší, či větší materiální škody, nebo o tragické katastrofy se ztrátami na životech lidí, vždy se snažíme najít příčinu, proč se daná havárie stala. Hledání příčin havárií má několik důvodů. V první řadě je to asi jistá přirozená zvědavost a snaha o poznání pravdy. Tento důvod je asi nejsilnější, protože v lidské povaze je jednoduše je jednoduše jistá potřeba vědět, proč a jak se daná událost stala, i kdyby to neznamenal už nic dalšího. Dalším důvodem objasňování havárií bývá snaha o zjištění, co nebo kdo nese zodpovědnost za selhání, a mohla tak být sjednána náprava. Hledání viníka havárie je totiž v podstatě jedním z hlavních důvodů vyšetřování havárií. Ve většině případů vyšetřování odhalí, že za katastrofou stojí lidské selhání. Jsou ovšem i případy, kdy lze havárii jednoznačně přičíst na vrub špatné konstrukci, vadnému příp. nevhodnému materiálu, zanedbání povinných kontrol, atd. V konečném důsledku vedou veškerá prováděná vyšetřování k odhalení konkrétní a jednoznačné příčiny havárie tak, aby bylo možno zavést preventivní opatření, která vyloučí opakování stejných chyb, které by mohly vést ke stejné havárii.

Nejrůznější technické havárie provází lidstvo prakticky po celou dobu jeho technického pokroku a s každým novým objevem vyvstávají též nové problémy. Občas se tak stává, že se zavedením nových materiálů nebo technologií do praxe vzniká nějaký, do té doby neznámý, problém, který se bohužel projeví až při havárii. S vynálezem parního stroje a s rozvojem železnice se tak objevily první problémy s únavou materiálu, s příchodem svařování velkých konstrukcí bylo nutno řešit otázku jejich dostatečné houževnatosti. Nemalé komplikace způsobily například i „modernizace“ do té doby běžně využívaných materiálů - viz například rozhodnutí o změně kompozitního materiálu zpevněného uhlíkovými vlákny namísto dosud používaného sklolaminátu u vrtulových listů, v důsledku kterého došlo ke zřícení helikoptéry po zásahu bleskem.

Zavádění nových technologií a materiálů do praxe s sebou tedy vždy nese jistá rizika, a je tedy na místě nejvyšší obezřetnost, zvláště pokud jde o životy lidí. Známe-li chování určitého materiálu v podmínkách, za jakých bude součástí z daného materiálu provozována, dokážeme pak z velké části předvídat rizika spojená s provozem takové součásti. Ke zjišťování chování materiálu za určitých podmínek je vyvinuta řada zkušebních postupů a to od nejjednodušších až po velmi sofistikované.

Úloha materiálových věd při řešení technických havárií však nespočívává jen ve vyšetřování nehod, za kterými stojí prokazatelná vada materiálu. Naopak častěji se řeší havárie způsobené špatnou konstrukcí, nedodržením technologických postupů, apod. Materiáloví specialisté také napomáhají řešit různé havárie, u kterých lze (například ze způsobu porušení součástí) zjistit příčinu dané události, která ani nemusí souviset právě s materiálem. V neposlední řadě jsou řešeny i případy, kdy je z různých důvodů požadována materiálová kontrola stávající konstrukce.

## 2. Železniční neštěstí v Eschede

### 2.1 Popis událostí

Dne 3. června 1998 došlo v obci Eschede v Dolním Sasku k nehorší železniční nehodě v dějinách Spolkové republiky Německo a zároveň to byla největší havárie vysokorychlostního vlaku všech dob. Toto neštěstí si vyžádalo 101 mrtvých a 88 zraněných.

Jednalo se o vysokorychlostní vlak InterCityExpress 884 jedoucí z Mnichova do Hamburku, který v době nehody vezl 287 pasažérů rychlostí 200 km/h. V 10:57 praskla důsledkem únavy materiálu obruč kola na třetí nápravě prvního vagonu. Obruč se z kola sloupila, narovнала a poté prorazila podlahu vagonu, přičemž zůstala zaklíněná mezi opěrkami sedadel, kde seděli pasažéři. V tuto chvíli nebyl nikdo zraněn, následoval však sled nešťastných událostí a náhod, které vedly ke katastrofě. Pasažér, u kterého obruč prorazila podlahu, nepoužil záchranou brzdu, ale šel hledat průvodčího, aby ho informoval. V dalším sledu událostí pak zaklíněná obruč kola narazila na vodící kolejnici výhybky, kterou vytrhla z pražců. Ta prorazila podlahu vagonu a tímto nárazem došlo k vykolejení zadního podvozku prvního vagonu. Jedno z vykolejených kol narazilo na další výhybku a přehodilo ji na vedlejší kolej. Zadní nápravy třetího vagonu vjely na druhou kolej, čímž došlo tak k roztržení vlaku. Vykolejená zadní část třetího vagonu podrazila pilíř silničního mostu vedoucího nad tratí a to způsobilo zhroucení mostu. Jelikož se most hroutil pozvolna, čtvrtý vagón ještě stihl projet pod mostem a překulil se na násep hned za ním, kde zabil 3 zaměstnance německých drah, kteří tam právě pracovali. Na pátý vagón se most zřítil a zcela jej rozdrtil. Zbývající vagóny se naskládaly před spadlým mostem jako skládací metr a dokonaly tak dílo zkázy (obr. 1) [1].

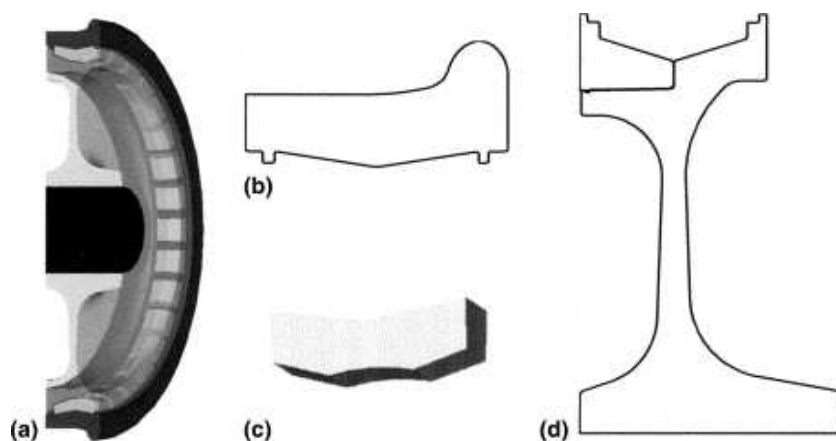


*Obr. 1: Letecký snímek havarovaného vlaku u Eschede [2]*

## 2.2 Příčiny nehody

Prvotní příčinou nehody byl tedy únavový lom obruče kola. U tohoto typu vlaku byla namísto klasických monoblokových kol použita obručová kola s vloženou vrstvou gumy mezi diskem a obručí, což poskytovalo cestujícím vyšší komfort cestování, protože vložená vrstva gumy výrazně tlumila vibrace při jízdě (obr. 2). Do té doby byla kola tohoto obručového typu používána pouze u tramvají a až do oné osudné nehody byla považována za spolehlivá i u vysokorychlostního vlaku. Vložená vrstva gumy umožňuje ocelové obruči větší deformaci, což při opakovaném namáhání vede k únavovému lomu. Při vyšetřování nehody též vyšlo najevo, že provozovatel vlaku byl upozorněn na možné problémy s únavou materiálu, ale nevěnoval tomuto varování přílišnou pozornost. Kola vlaků tak byla dále kontrolována pouze vizuálně. Vizuální kontrola je ale u takového kola naprosto nedostačující, protože odhalí pouze větší trhliny a navíc u tohoto typu kol se mohou únavové trhliny iniciovat i na vnitřní straně obruče, což vizuální kontrola neodhalí vůbec. Únavové trhliny lze zjistit speciálními ultrazvukovými defektoskopy. Technici, kteří kontrolovali kola, vykonali též několik defektoskopických zkoušek, ale jejich výsledky považovali za nehodnověrné, protože přístroje jim hlásily chyby. Zvláštností případu je, že právě kolo, které způsobilo nehodu, prošlo týden před havárií kontrolou a tři nezávislé přístrojové testy na něj upozornily jako na poškozené. Další věcí, která již před nehodou nasvědčovala poškození kola, byly vibrace a zvuky vycházející z podvozku, kde bylo poškozené kolo. I přesto ale kolo nikdo nevyměnil.

Jako další příčiny nehody byly stanoveny nevhodná konstrukce silničního mostu a nezastavení vlaku hned v okamžiku, kdy obruč kola prorazila podlahu vagónu [1].



*Obr. 2: Sestava skládaného obručového kola, (a) řez modelem skládaného kola, (b) tvar obruče v řezu, (c) gumová vložka, (d) tvar náboje v řezu [3]*

### 3. Destrukce vrtule letounu Embraer EMB-120RT u Atlanty

#### 3.1 Popis události

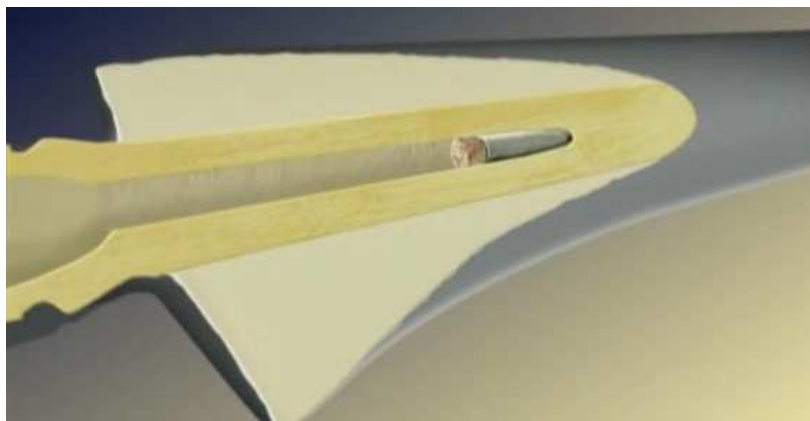
21. srpna 1995 ve 12.23 odstartoval z letiště v Atlantě let č. 529 společnosti Atlantic Southeast Airlines s cílovou destinací v Gulfportu. Jednalo se o stroj Embraer EMB-120RT Brasilia. Na palubě se nacházelo 26 cestujících, 2 piloti a 1 letuška. Ve 12.42, ještě před dosažením letové hladiny 7200 m, zaslechli lidé na palubě ohromnou ránu a letadlo se v ten moment naklonilo doleva. Varovná světla a zvukové signály oznámily potíže s levým motorem a letadlo začalo rychle ztrácet výšku. Oba piloti spojili své síly, aby let vyrovnali, protože hrozilo, že se propadnou do vývrtky a zřítí se na zem. Piloti věděli, tento typ letadel umožňuje letět i s jedním funkčním motorem, ale v tomto případě byl nefunkční levý motor úplně vytržen ze svého lože a jeho poškození velice narušilo aerodynamiku letounu. Stroj prudce klesal, a proto se kapitán rozhodl pro přistání na nejbližším letišti. Piloti obeznámili letového dispečera s kritickou situací, ten však ve zmatku a kvůli tomu, že byl zaneprázdněn řešením krizové situace, zapomněl uvědomit záchranné týmy. Rychlost klesání ale byla stále příliš vysoká a nedařilo se ji snížit. Pilotům tak bylo jasné, že letiště se nachází stále příliš daleko, a tak posádka hledala jiné vhodné místo pro přistání. Letadlo nakonec dosedlo v poli u vesnice Burwell ve státě Georgia. Letoun se rozlomil na dvě části, ale jako zázrakem zůstalo všech 29 osob naživu a jen několik jich utrpělo vážnější zranění. Z proražených nádrží vytékalo palivo a letoun pak začal hořet. Plameny tak uvěznily některé pasažéry ve vraku. Místní záchranné týmy reagovaly ihned, byly však kilometry daleko. Nakonec tedy z devětadvaceti lidí na palubě osm vyvázlo bez vážnějších následků a z jedenadvaceti těžce zraněných nakonec svým zraněním deset podlehl. Tragédie letu 529 byla tedy především v tom, že nouzové přistání přežili všichni lidé a zabíjel pak oheň (obr. 3) [4].



*Obr. 3: Letecký snímek havarovaného letadla Embraer EMB-120RT [5]*

## 3.2 Co přineslo vyšetřování

V místě chybějícího listu vyšetřovatelé objevili stopy, které jednoznačně svědčily o tom, že se jednalo o únavový lom. Již v předchozích letech se u těchto letadel objevily podobné případy nehod. Tehdejší havárie si vyžádaly prohlídku všech používaných vrtulových listů a vyšetřovatelé zjistili, že i tento list byl jako podezřelý poslán výrobci k přezkoumání. Mechanik ale nic neobjevil. Pouze dostal příkaz list přebrousit. Tím ale nevědomky odstranil stopy po trhlinách, které později neodhalila ani důkladnější kontrola ultrazvukem. Listy vrtule jsou duté a uvnitř mají vyvažovací závaží, která jsou utěsněna korkem napuštěným chlorem (obr. 4). A právě ten způsobil korozi i u minulých nehod. Navíc list vrtule letu 529 praskl ve stejném místě jako v předchozích případech a to 33 centimetrů od vrtulového náboje, což je v prostoru, kde se měl přibližně nacházet utěšňovací korek. Lom tedy způsobila trhлина vzniklá spojením četných korozních důlků, které nebyly při prohlídce objeveny. Ulomený list vrtule pak způsobil vychýlení vrtule z rovnováhy, což následně způsobilo, že se motor vytrhl z lože a vrtule se zasekla do křídla. Po této nehodě pak výrobce vrtulí natolik zpřísnil kritéria prohlídek a upravil servisní postupy, aby se již podobná nehoda nemohla opakovat [4].



Obr. 4: Řez modelem listu vrtule s vyvažovacím závažím a utěšňovacím korkem [4]

## 4. Explosivní dekomprese Boeingu 737 nad Havajskými ostrovy

### 4.1 Popis událostí

28. dubna 1988 krátce po 13.25 místního času vzlétal z letiště Hilo International Airport Boeing 737 patřící společnosti Aloha Airlines. Na palubě letu č. 243 do Honolulu se nacházelo 90 cestujících a 5 členů posádky. Ve 13.46, kdy se letadlo již nacházelo v požadované letové výšce 7300 m, se náhle ozvala exploze, která utrhla 35 m<sup>2</sup> trupu. Nad prvními pěti řadami sedadel chyběl strop i boční stěny trupu. Cestující na palubě se tak ocitli v silném mrazivém vichru. Letušky na rozdíl od cestujících nebyly připoutány a jedna z nich byla při explozi vysáta ven z letadla. Nakonec však tato letuška byla jedinou obětí tohoto letu. Stroj držely pohromadě jen úzké podlahové nosníky. Podlaha se prohýbala a bylo patrné, že se letadlo uprostřed bortí. Pilotům se ale dařilo držet stroj alespoň částečně pod kontrolou a zahájili sestup do nižší letové hladiny. Rozhodli se pro přistání na nejbližším letišti na ostrově Maui, kde ale hrozilo riziko poryvů větru. Při přistávání vznikl další problém. Kontrolka nesignalizovala vysunutí předního kola podvozku a bez něj by se letoun při přistání na zem



zřejmě rozlomil. Naštěstí ale pozemní vizuální kontrola potvrdila vysunutí podvozku a přistání i s takto poškozeným letounem se nakonec podařilo (obr. 5) [6].



*Obr. 5: Snímek poškozeného Boeingu 737 pořízený po přistání na ostrově Maui [7]*

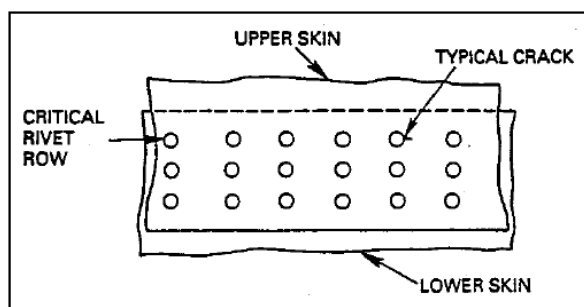
## **4.2 Co přineslo vyšetřování**

Tento Boeing 737 byl vyroben v roce 1969 s předpokladem zhruba dvaceti let provozu na 75 000 letů. Počet letů byl však u tohoto stroje překročen a jedním z problémů tohoto letadla bylo také to, že létal pouze na krátké trasy, avšak velmi často. Trup letadla je v letových výškách vystaven namáhání přetlakem a tím, jak letadlo opakovaně vzlétá a přistává, je toto namáhání trupu cyklické. Při velmi časté frekvenci vzletů a přistání, jako tomu bylo právě u tohoto letadla, je trup letadla mnohem častěji vystaven cyklickému namáhání přetlakem oproti jiným strojům, které létají na delší vzdálenosti. Do této nehody byly prováděny prohlídky v intervalech, které vycházely výhradně z počtu letových hodin. Od této nehody byla zásadně změněna kritéria povinných servisních prohlídek letounů, která výrazným způsobem zohledňovala mimo dosavadního počtu nalétaných hodin i počet vzletů a přistání.

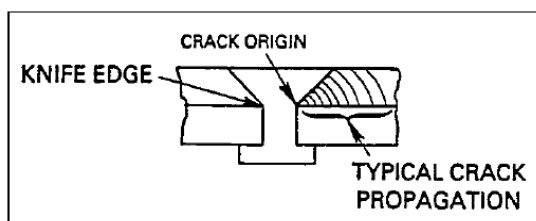
Trupy letadel se staví s jednotlivých plátů, které se spolu spojují nýtováním a navíc se ještě lepší silným epoxidovým lepidlem. Záměrem je, aby se namáhání trupu přeneslo především na lepený spoj a ne na nýty. Výrobce ve svých publikacích varoval, že u některých letounů by mohlo po čase dojít k rozlepení spoje, protože nemusel být správně dodržen technologický postup lepení. Právě u tohoto Boeingu 737 vyšetřovatelé zjistili, že došlo k rozlepení spojů a namáhání se tak přeneslo na nýty, a to především na horní řadu (obr. 6). V okolí nýtů pak začaly postupně vznikat drobné únavové trhliny, kterých si bohužel při kontrolách stroje nikdo nevšiml (obr. 6, 7, 8).

Vyšetřovatelům ale nebylo jasné, proč se utrhla tak velká část trupu, když jsou letouny vybaveny výztuhami, které by měly omezit potenciální díru v trupu na čtverec o straně 25 centimetrů. Vyšetřovatelé nakonec dospěli k názoru, že trhlina bylo tolik, že se nakonec spojily a došlo tak utržení velké části potahu, čemuž nezabránily ani výztuhy. Podle jiné teorie ovšem došlo k tomu, že skutečně vzniknul menší otvor v trupu, do něhož pak byla nasáta letuška, což v ten moment zablokovalo únik vzduchu, čímž na okamžik vznikl velký dynamický přetlak, který utrhl střechu letadla [6].





Obr. 6: Nákres nýtovaného spojení plátů potahu  
 Překlad: upper skin = svrchní plát, lower skin = spodní plát,  
 typical crack = typická trhлина, critical rivet row = kritická řada nýtů [8]



Obr. 7: Nákres řezu přeplátovaného nýtovaného spoje s naznačením vzniku a šíření trhlin  
 Překlad: crack origin = počátek vzniku trhlin, knife edge = ostrá hrana,  
 typical crack propagation = typické šíření trhliny [8]



Obr. 8: Bližší pohled na utržený plát potahu v místě snýtování,  
 šipky označují místa šíření únavových trhlin, rozteč nýtů je přibližně 25 mm [6]

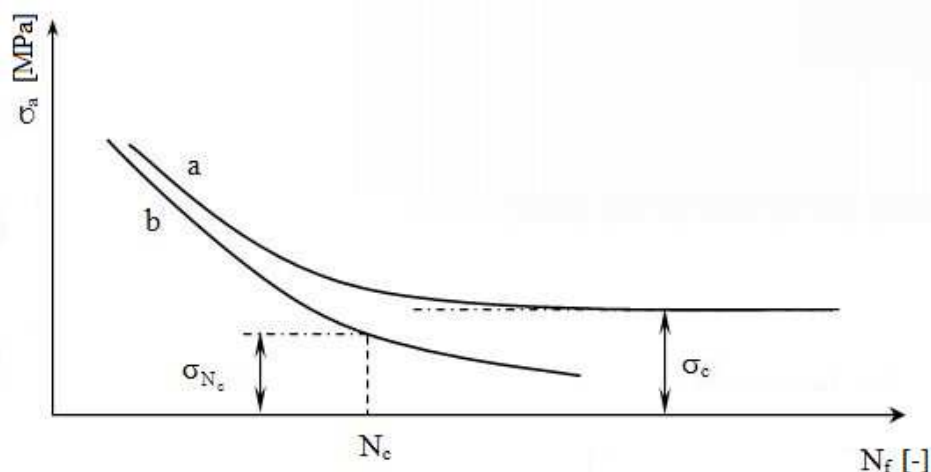
## 5. Únava materiálu

Únava materiálu je velmi častým důvodem selhání součásti nebo celé konstrukce. U dynamicky namáhaných konstrukcí, se tento jev projevuje většinou až po delším čase normálního provozu součásti a počátky únavového poškození se odehrávají zpravidla nenápadně, takže si jich často ani nevšimneme. V této práci jsou jako konkrétní příklady havárií způsobených právě únavovým poškozením materiálu popsány tyto případy: nehoda vlaku u Eschede, ulomení vrtule u letedla Embraer a utržení části trupu při letu Aloha 243.

## 5.1 Základní údaje

Pojem únava materiálu je znám již více než 150 let a první popsané únavové lomy souvisely s cyklicky namáhanými součástmi, jako byly například osy železničních vagónů, součásti parních strojů apod. Byla tu tedy snaha o popis této problematiky a stanovení takové mechanické charakteristiky, která by umožnila přesně optimalizovat působící napětí a životnost cyklicky zatěžovaných součástí.

Jednou ze základních mechanických charakteristik únavy materiálu je Wöhlerova křivka (obr. 9) označovaná také jako S-N křivka, která udává závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě napětí  $\sigma_a$  (při daném středním napětí). V základu se rozlišují dva druhy materiálů, které mají rozdílné chování při cyklickém zatěžování. U nízkouhlíkatých ocelí se Wöhlerova křivka v určitém místě, které bývá  $10^6$  až  $10^7$  cyklů, zpravidla začne velmi rychle asymptoticky blížit určité konstantní velikosti amplitudy napětí a tuto velikost amplitudy napětí značíme jako mez únavy  $\sigma_c$ . U neželezných kovů, u kterých není asymptotická část křivky, počítáme s časovanou mezí únavy  $\sigma_{N_c}$ . Například u hliníkové slitiny 7075-T73, ze které byla vyrobena vnitřní část vrtule letounu Embraer, je udávaná hodnota časované meze únavy  $\sigma_{N_c} = 150$  MPa při počtu cyklů  $N_c = 5 \cdot 10^8$  a nulovém středním napětí [9] [10].

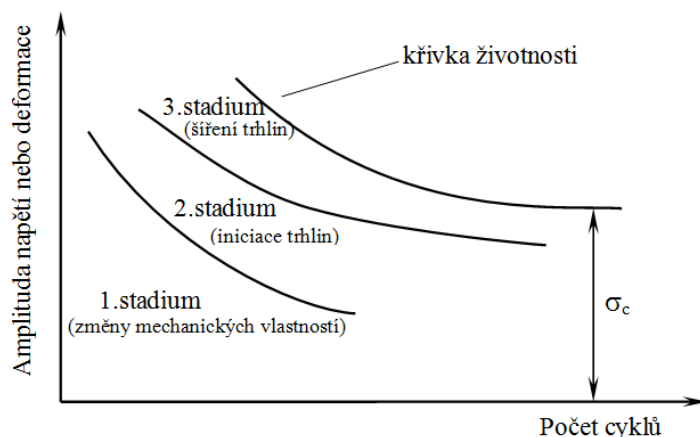


Obr. 9: Wöhlerova křivka; křivka *a* je typická pro nízkouhlíkaté oceli, křivka *b* je typická pro ostatní neželezné kovy,  $\sigma_a$  – amplituda napětí,  $\sigma_c$  – mez únavy,  $\sigma_{N_c}$  – časovaná mez únavy,  $N_f$  – počet cyklů do lomu,  $N_c$  – počet cyklů do lomu při časované mezi únavy [9]

Únavu materiálu dělíme dále na vysokocyklovou, kde se počet cyklů do lomu pohybuje v řádu  $10^5$  a výše, a na nízkocyklovou, kde počet cyklů do lomu nepřesáhne hodnotu  $10^5$ . U všech tří zde popisovaných havárií lze říct, že se jednalo o únavu vysokocyklovou [11].

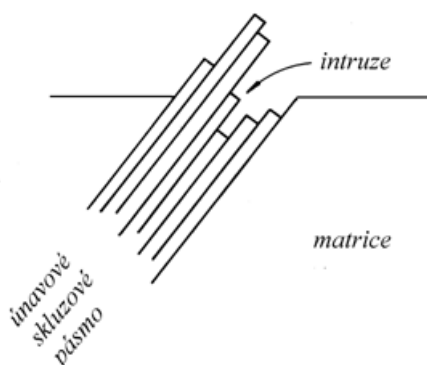
## 5.2 Stádia únavového procesu

Únava materiálu je v základu podmíněna cyklickou plastickou deformací, protože elastická deformace nevede ani při nekonečném počtu cyklů k nevratným změnám materiálu. Oproti tomu nepatrná ale mnohokrát opakovaná plastická deformace vede ke kumulativnímu poškození, které končí lomem. Podle typu nevratných změn způsobených cyklickou plastickou deformací, lze celý únavový proces rozdělit na tři na sebe navazující stádia (obr. 10) [9] [11].



Obr. 10: Stádia únavového procesu (schematicky) [9]

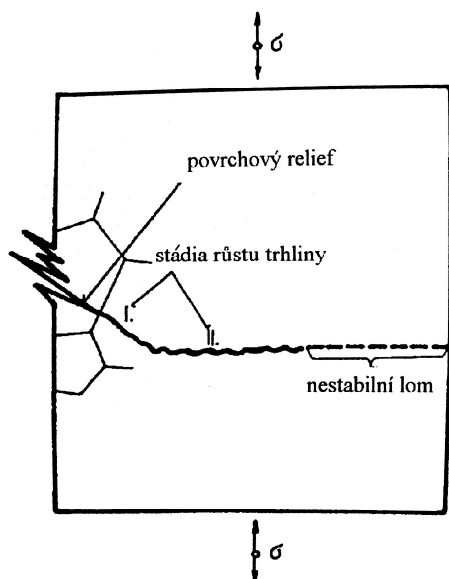
- a) **Stádium změn mechanických vlastností.** Toto stádium souvisí se změnami v celém objemu materiálu. Mění se hustota a konfigurace mřížkových poruch v materiálu, vlivem čehož dochází buď k cyklickému zpevnění, nebo cyklickému změkčení [11].
- b) **Stádium nukleace trhlin.** Toto stádium se týká už jen malé části objemu materiálu, především povrchových oblastí, a to nejčastěji v místech, kde se vyskytují jakékoliv koncentrátoři napětí – vruby (konstrukční i technologické). V případě materiálů s nehomogenitami, vměstky a dutinami může k nukleaci docházet přednostně v jejich blízkosti. To znamená, že v určitých speciálních případech může docházet k nukleaci trhlin i uvnitř tělesa. Jak je vidět na obr. 14, tak iniciace únavové trhliny u prasklé obruče kola vysokorychlostního vlaku vznikla na vnitřní straně obruče přibližně v místě tvarového výstupku, který zajiště sloužil jako koncentrátor napětí. V případě zde popisované havárie Boeingu 737 posloužily jako koncentrátoři napětí díry pro nýty, jak lze vidět na obr. 6, 7, 8 a v případě ulomení listu vrtule letounu Embraer vznikla trhlinka z řady korozních důlků, které rovněž zvyšovaly lokální napětí (obráz. 15). Zárodky únavových trhlin vznikají nejčastěji v perzistentních skluzových pásech, kde se uplatňuje takzvaný kartový mechanismus (obráz. 11) [9] [11].



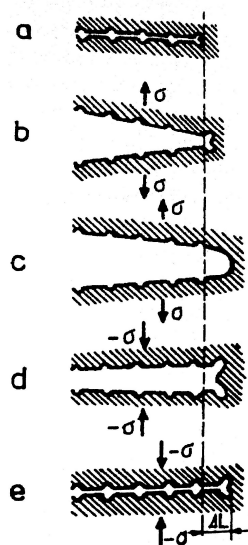
Obr. 11: Schéma kartového mechanismu v perzistentním skluzovém pásmu [9]

- c) **Stádium růstu trhlin** (obráz. 12). Růst trhliny má obvykle dvě stádia. První stádium zahrnuje krystalografický růst trhliny v rovině maximálního smykového napětí, tj. pod úhlem 45° ke směru působení cyklického tahového napětí. V tomto stádiu je velmi pomalý růst trhliny a délka trhliny odpovídá řádově několika desetinám milimetru. Druhé stádium je charakterizované nekystalografickým růstem trhliny ve směru kolmém na směr zatěžování. Pro růst trhliny v tomto stádiu jsou typické periodicky se opakující žlábkové viditelné na lomové ploše. Tyto žlábkové jsou vytvářeny takzvaným

Lairdovým mechanismem růstu únavové trhliny (obr. 13). Trhlina takto roste až do okamžiku, kdy dosáhne kritické velikosti a poté dojde k nestabilnímu lomu součásti [9] [11].



Obr. 12: Stádia růstu trhlín [11]



Obr. 13: Lairdův mechanismus růstu únavové trhliny [11]

### 5.3 Únava materiálu vzhledem k druhu konstrukce

Únavové namáhání materiálu lze též dělit na únavové namáhání součásti bez trhliny a na únavové namáhání součásti s trhlinou. Únavová životnost součásti bez trhliny je dána dobou inicializace trhliny a do této kategorie lze zařadit například právě obruč kola vysokorychlostního vlaku. U tohoto druhu únavy se vychází především ze znalosti Wöhlerovy křivky. Pro dané parametry cyklického namáhání se součásti se navrhují tak, aby se u nich při určitém předpokládaném počtu cyklů neiniciovala únavová trhlina.

Únavová životnost součásti s trhlinou je dána rychlostí šíření trhliny a do této kategorie lze zahrnout například svařované konstrukce, tlakové nádoby nebo i draky letadel. Typickým příkladem takové únavy byl Boeing 737, jehož nehoda byla výše popisována, u kterého se trhliny rozšířily natolik, že došlo k explozivní dekompresi. U takovýchto konstrukcí se předpokládá, že vždy obsahují trhliny a během provozu se mohou tyto trhliny zvětšovat vlivem cyklického zatěžování. Provoz takovéto konstrukce je bezpečný, dokud trhliny nedosáhnou kritické velikosti, při níž dojde k iniciaci nestabilního lomu. Pro bezpečný provoz součástí musíme tedy znát dobu, po kterou může být konstrukce bezpečně provozována, neboli jaký počet zátěžových cyklů může proběhnout, než některá z existujících trhlín doroste do kritické délky. Právě bezpečnost letadel je založena na pravidelných prohlídkách, které mají včas odhalit možné trhliny a případně zabránit tomu, aby tyto trhliny dorostly do stádia, kdy by byla ohrožena bezpečnost stroje [11].

## 5.4 Únava materiálu v korozním prostředí

Na únavu materiálu má navíc velký vliv okolního prostředí. Korozní prostředí může urychlit iniciaci a růst únavové trhliny. V základu rozeznáváme dva základní mechanismy únavy materiálu v korozním prostředí. Prvním z těchto mechanismů je vznik korozních důlků, které působí jako koncentrátoři napětí. Druhý mechanismus se nazývá korozní praskání pod napětím a spočívá v tom, že chemická látka způsobující korozi se dostane až ke špičce trhliny a tam dochází k chemické reakci, která způsobuje další růst trhliny. Pokud se navíc ke koroznímu praskání přidá cyklické zatěžování, pak hovoříme o korozní únavě. Vlivem korozního prostředí se tak výrazně snižuje únavová životnost součásti, což byl právě případ poškození a destrukce vrtule letounu Embraer [11].

## 6. Šíření trhlín v materiálu

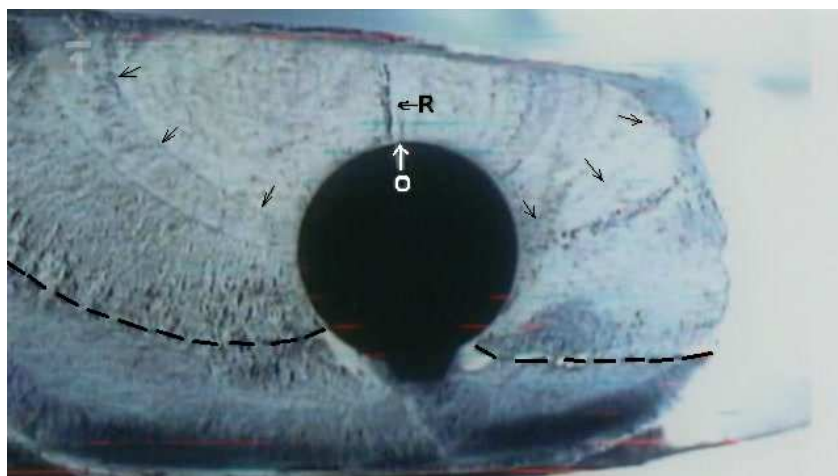
Pokud součást obsahuje trhlínu, pak se při určité kombinaci napětí a délky trhliny stává tato trhlína nestabilní a dochází tak k takzvanému katastrofickému lomu. Při tomto nestabilním lomu součásti se trhlína zpravidla šíří až rychlostí zvuku v materiálu. Pro zjištění odolnosti materiálu, vůči nestabilnímu lomu se v praxi nejčastěji používá materiálová charakteristika, kterou nazýváme lomová houževnatost a je označovaná jako  $K_C$ . Hodnota  $K_C$  je také často označována jako kritická hodnota součinitele intenzity napětí. Aby došlo k nestabilnímu lomu součásti, musí platit, že  $K_C = \sigma \sqrt{\pi c}$ , kde  $\sigma$  je napětí v součásti,  $c$  je kritická velikost trhliny při tomto napětí  $\sigma$  a známé hodnotě lomové houževnatosti  $K_C$ . Například u hliníkové slitiny 7075-T73, ze které byla vyrobena vnitřní část vrtule letounu Embraer je udávaná hodnota  $K_C = 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  a u oceli, ze které byla vyrobena obruč kola vysokorychlostního vlaku InterCityExpress 884 byla hodnota lomové houževnatosti  $K_C = 86,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , což jsou hodnoty typické pro tyto konstrukční materiály [3] [10] [11].

Na obr. 14, kde je snímek lomové plochy obruče kola, lze pozorovat, že poměrně velkou část lomové plochy zabírá oblast, kdy se trhlína šířila stabilně Lairdovým mechanismem. To lze přičíst relativně nízkém nominálním napětí a vcelku vysoké lomové houževnatosti materiálu. Experimentálně bylo navíc zjištěno, že stabilní růst trhliny v obruči kola trval přibližně 35 milionů cyklů, což odpovídalo zhruba 95 000 ujetým kilometrům [3].



Obr. 14: Snímek lomové plochy prasklé obruče kola [12]

Obr. 15 ukazuje lomovou plochu listu vrtule havarovaného letounu Embraer. I na tomto snímku lze pozorovat relativně velkou plochu stabilního šíření trhliny, což rovněž vypovídá o relativně nízkém nominálním napětí v materiálu a relativně dobré lomové houževnatosti materiálu.



*Obr. 15: Snímek lomové plochy listu vrtule, místo „O“ označuje oblast vzniku trhlín, místo „R“ označuje místo s vysokou koncentrací napětí, menší neoznačené šipky určují směr šíření únavového lomu, čárkovaná čára označuje hranici stabilního růstu únavové trhliny [5]*

Stabilní růst trhliny v materiálu může trvat relativně dlouhou dobu, než dojde k nestabilnímu lomu součásti, čehož je dobrým příkladem obruč kola vysokorychlostního vlaku. U konstrukcí, kde lze předpokládat výskyt trhlín případně jejich další růst, je v určitých případech nutné trhliny detekovat a dále sledovat jejich růst, aby nedosáhly kritické velikosti.

Pro vyhledávání a kontrolu trhlín lze využít například zkoušku ultrazvukem, která funguje na principu šíření a odrazivosti zvukových vln v materiálu nebo radiologické zkoušky, které fungují na principu průchodu pronikavého záření materiálem, jako například rentgenového záření. V případě že se stabilní trhlina rozšiřuje a není úplně potřebné vyměnit celou součást, lze růst trhliny zbrzdít nebo zastavit použitím různých opatření jako například:

- snížení velikosti zatížení
- zesílení materiálu
- zavaření trhliny
- odbroušení trhliny
- zaoblení ostrého čela trhliny tím, že se ve špičce trhliny vyvrtá otvor
- a jiné

## **7. Pád vrtulového letounu Convair CV-580 do Severního moře**

### **7.1 Popis události**

8. září 1989 v 15:59 odstartoval z norského letiště v Oslo-Fornebu charterový let č. 394 do Hamburku. Jednalo se o typ stroje Convair CV-580 patřící společnosti Partnair (obr. 16). Když se letoun nacházel zhruba 100 kilometrů od dánského pobřeží nad Severním mořem, začal se náhle převracet na záda a letoun se naprosto vymknul kontrole. V 16:38 zmizelo

letadlo z radaru pozemního střediska a bylo jasné, že se letoun zřítil do moře. Při této nehodě zahynulo všech 55 lidí na palubě [13].

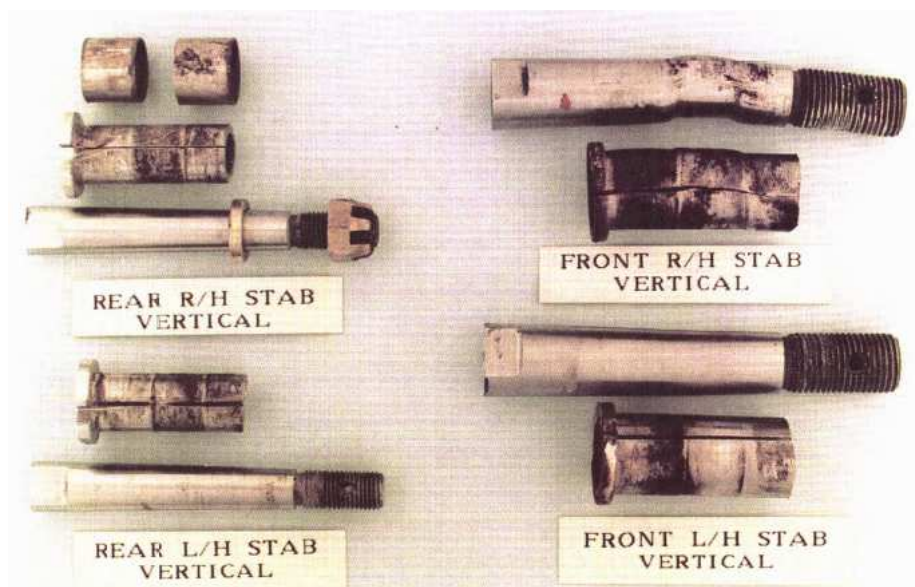


*Obr. 16: Fotografie letadla před nehodou [14]*

## 7.2 Co přineslo vyšetřování

Při vyšetřování bylo zjištěno, že letoun se do moře zřítil naprosto nečekaně a pozemní středisko ani záchranná služba nezachytila žádná nouzová volání. Vyšetřováním byla vyvrácena možnost bombového útoku i to, že by nehodu způsobily nové, výkonnější motory, které byly namontovány, čemuž zprvu nasvědčovalo to, že se letoun rozlámal už ve vzduchu. Nalezený hlasový záznamník byl vinou špatné úpravy nefunkční a zaznamenával zvuky pouze před vzletem. Byl nalezen i zapisovač letových údajů. Byl to však jednoduchý model používající posunující se pruh kovové fólie, do které kovové hroty vyškrabávaly záznam. Zvláštností bylo, že jeden záznam vypadal, jako by byl vyryt dvakrát, což bylo později vysvětleno vlivem vibrací. Dále bylo zjištěno, že tyto vibrace způsobovala záložní zdrojová jednotka umístěná v zadní části letounu, která byla zapnutá, protože letoun musí mít alespoň dva nezávislé zdroje energie. Druhý generátor nefungoval. Inspektoři zjistili, že jeden ze tří závěsů záložní zdrojové jednotky byl zlomený vinou špatného svaru a to již delší dobu před havárií. Další zjištění bylo, že vlivem opakovaného ohýbání došlo k přehřátí ocasních ploch letounu a že již za letu došlo k utržení částí svislé ocasní plochy. Vyšetřovatelé se tedy soustředili na vibrace v zadní části letounu, ale tušili, že samotné vibrace záložní zdrojové jednotky nemohly být tak silné, aby způsobily destrukci letadla. Záznamy prozrazovaly, že po výměně jednoho ze čtyř šroubů, kterými je připevněna k trupu svislá ocasní plocha vibrace na čas ustaly. Inspektorům se podařilo najít všechny čtyři tyto šrouby a po jejich přezkoumání zjistili, že ani jeden ze tří původních šroubů není certifikován (obr. 17). Šrouby neměly vyhovující rozměrovou přesnost, ani drsnost povrchu a navíc měly malou pevnost a tvrdost. Šrouby s malou pevností a nevyhovujícími rozměry nebyly dostatečně pevné na to, aby dokonale připevnilly ocasní plochy, což zapříčinilo silné vibrace. Spolupůsobení vibrací ocasních ploch a záložní zdrojové jednotky v konečném důsledku způsobilo rozkývání a zablokování směrovky. Letadlo se začalo převracet na záda, vyvažovací závaží směrovky pak vyrazila kryt a poté se ocasní plochy i se zbytkem trupu začaly rozpadat [13].





*Obr. 17: Fotografie čtyř šroubů, které spojovali svislou ocasní plochu s trupem  
Překlad: rear = zadní, front = přední, R/H = pravý, L/H = levý,  
stab vertical = vertikální stabilizátor [15]*

### 7.3 Výsledky zkoumání šroubů

Ve vyšetřovací zprávě o nehodě je uvedeno, že šrouby pro spojení svislé ocasní plochy s trupem mají mít tvrdost 390 HV5. Vyšetřovatelé ale zjistily, že pouze šroub zadního pravého spoje měl odpovídající tvrdost. Jednalo se právě o šroub, který byl před nehodou naposledy vyměněn. U ostatních šroubů byla naměřena tvrdost v rozmezí 200 až 230 HV5. Protože pro zjištění meze pevnosti šroubů nebylo možné použít klasickou zkoušku tahem, bylo nutné určit pevnost šroubů alespoň přibližně podle vzorců udávajících vztah mezi tvrdostí materiálu a mezí pevnosti, popřípadě mezí kluzu. Pro běžné konstrukční materiály, jako na například nízkouhlíkové nebo nízkolegované oceli a případně litiny, se uvádí přibližná závislost meze pevnosti na tvrdosti jako  $HV = (0,3 - 0,35)R_m$  a závislost meze kluzu na tvrdosti jako  $HV = (0,2 - 0,3)R_e$ . V těchto vztazích lze namísto tvrdosti podle Vickerse (HV) použít i hodnotu tvrdosti podle Brinnela (HB). Hodnoty pevnosti materiálu musely být tedy stanoveny podle těchto nebo podobných vztahů. Ve vyšetřovací zprávě je též uvedeno, že naměřená tvrdost v rozmezí 200 až 230 HV5 odpovídá přibližně 700 MPa, kdežto požadavek na pevnost šroubů, který vychází právě z požadované tvrdosti, je v rozmezí od 1100 MPa do 1250 MPa. Neoriginální šrouby tak měly pouze 60% požadované pevnosti a další analýza prokázala, že nízká pevnost těchto padělaných součástí byla způsobena nesprávným tepelným zpracováním při výrobě. U šroubů tak vlivem silného namáhání docházelo k plastickým deformacím. Tím že šrouby povolily, tak mohlo snadno docházet k vibračním ocasní části, které vedly až k celkové destrukci letounu. Výsledkem vyšetřovací zprávy bylo tedy to, že havarii způsobily především tři necertifikované šrouby [13] [15].



## 8. Požár seníku v Soběrazi u Jičína

### 8.1 Popis události

10. září 2007 večer vypukl požár velkokapacitního seníku v obci Soběraz u Jičína. Přibližně po dvou hodinách se hasičům podařilo dostat požár pod kontrolu. Shořelo celkem 600 tun sena, manipulační jeřáb a zničena byla také střecha haly (obr. 18, 19). Při požáru nebyl nikdo zraněn a podle odhadů se celková škoda vyšplhala na 3 miliony korun. Otázkou bylo, do jaké míry požár poškodil konstrukci haly a které prvky lze při rekonstrukci ponechat. [16]



*Obr. 18: Fotografie seníku po požáru (venkovní pohled) [16]*



*Obr. 19: Fotografie seníku po požáru (pohled zevnitř) [16]*

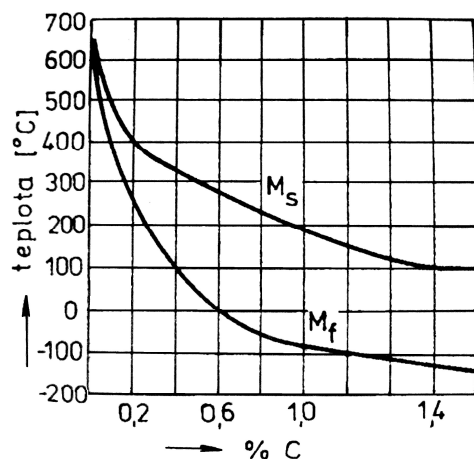
### 8.2 Co přineslo vyšetřování

Maximální teplota, která byla při požáru dosažena, byla jednoznačně dána roztavenými prvky zastřešení a opláštění a dále zbytky roztaveného skla v zasklených bocích haly pod střechou. Teplota tavení hliníkové střešní krytiny se pohybuje přibližně od 650°C do 750°C. Teplota tavení skla je již od 700°C. Podle zprávy hasičů tedy mohla být lokálně dosažena teplota až 1000°C. Podle předpokladů lze očekávat, že na většině konstrukce byla dosažena teplota menší než 800°C. Při požáru naštěstí nedošlo k překročení únosnosti střešní konstrukce, která byla vystavena vysokému žáru a zatížení vahou, a nedošlo tak ke zborcení

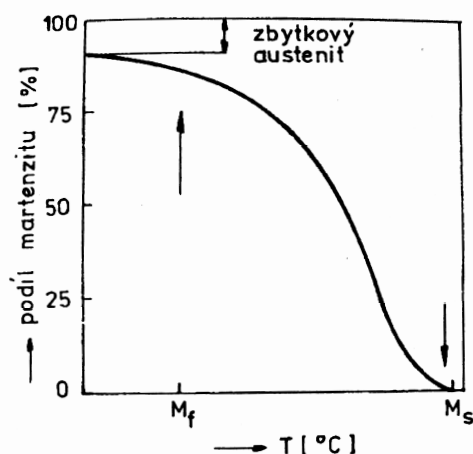
střechy. Problémem ovšem bylo to, že při hašení došlo k prudkému ochlazení rozžhavených ocelových nosných prvků a šroubových spojů. Hrozilo tedy riziko, že došlo ke změně původní struktury a ke vzniku nestabilních křehkých martenzitických struktur, které jsou pak náchylné ke křehkému lomu. Z konstrukce byly tedy v omezené míře odebrány vzorky, které byly dále zkoumány a podrobeny zkouškám, aby se zjistilo, jak byla konstrukce haly ovlivněna požárem a následným hašením. Z tahových zkoušek vyplynulo, že se jedná pravděpodobně o ocel 11 373 s odpovídající mezí kluzu  $R_e = 210 \text{ MPa}$ . Vrubová zkouška jednoho náhodně vybraného vzorku z okraje nosníku dala hodnotu  $118 \text{ J/cm}^2$ , což je plně dostačující hodnota, ale nelze vyloučit, že by lokálně mohla být zhoršená kvalita oceli. Z metalografických výbrusů vzorků staticky namáhané konstrukce vyplynulo, že ocel má feriticko perlitickou strukturu a nedošlo v ní ke vzniku martenzitických struktur ani k výraznému zhrubnutí zrna. Po tomto prozkoumání byl ještě proveden orientační statický výpočet konstrukce, ze kterého vyplynulo, že bezpečnost konstrukce vyhovuje. Verdikt byl tedy nakonec takový, že ocelovou staticky namáhanou konstrukci je možno ponechat. Vzhledem k tomu, že jeřábová dráha byla při požáru zkřivená a stále hrozilo riziko, že v některých místech mohlo dojít ke vzniku křehkých struktur, bylo doporučeno demontovat dynamicky namáhané součásti, tj. jeřábovou dráhu a mostový jeřáb, a při rekonstrukci haly namontovat nové [17].

### 8.3 Martenzitická transformace

Po požáru seníku v Soběrazi u Jičína bylo zjišťováno, zda v materiálu nedošlo ke vzniku křehkých martenzitických struktur. Martenzitická transformace je bezdifuzní přeměna austenitu, což znamená, že při přeměně nedochází k substituční ani intersticiální difuzi atomů uhlíku. Martenzit je tedy nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Ve struktuře materiálu má zpravidla tvar jehlic a jeho vlastnostmi jsou především vysoká tvrdost a pevnost, zároveň však malá tvárnost a houževnatost. Aby martenzit mohl vzniknout, je nutné ochladit austenitizovanou ocel pod teplotu  $M_s$  (počátek tvorby martenzitu) v čase kratším, než je doba potřebná k zahájení perlitické nebo bainitické přeměny. Martenzitická přeměna v materiálu začíná ihned po dosažení teploty  $M_s$ . Každé teplotě pod  $M_s$  odpovídá u daného materiálu určitý podíl martenzitu, který lze zvyšovat dalším snižováním teploty. Úplné ukončení martenzitické transformace nastane až po dosažení teploty  $M_f$  (konec tvorby martenzitu). I poté však zůstává část austenitu netransformována a nazýváme jej zbytkový austenit. Na velikosti teplot  $M_s$  a  $M_f$  má největší vliv především obsah uhlíku v oceli (obr. 20) a dále pak na obsahu legujících prvků. Charakteristiku vyjadřující závislost mezi teplotou a podílem martenzitické fáze nazýváme martenzitickou křivkou (obr. 21) [11] [18].



Obr. 20: Vliv obsahu uhlíku na teploty  $M_s$  a  $M_f$  [11]



Obr. 21: Martenzitická křivka [11]

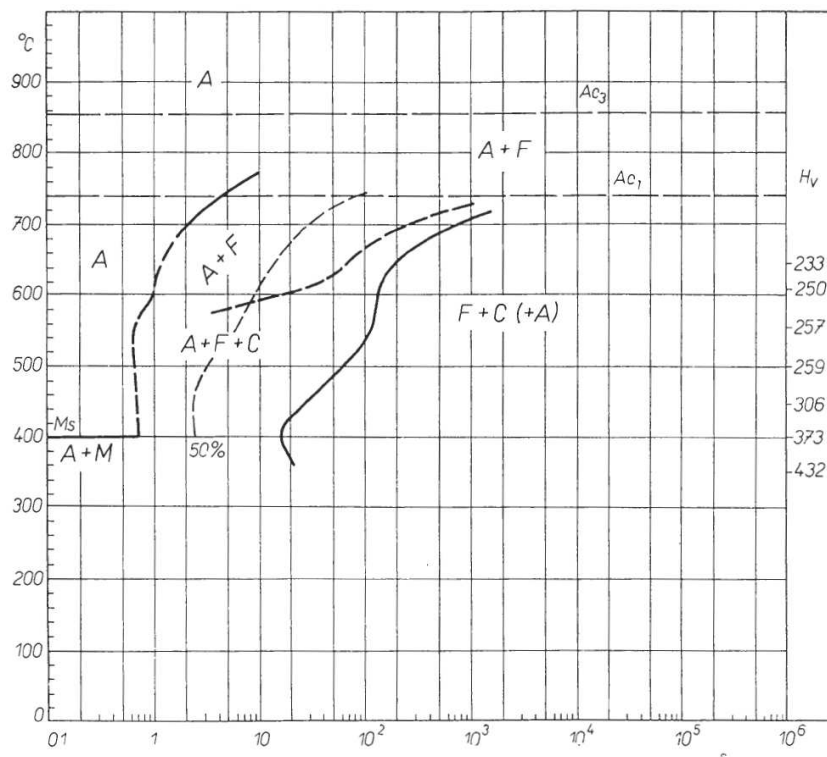
Ze znalosti kinetiky přeměn vychází konstrukce transformačních diagramů, které vyjadřují teplotní a časovou závislost průběhu přeměn přechlazeného austenitu. Používané transformační diagramy jsou v zásadě dvojího druhu. Diagram IRA (izotermický rozpad austenitu) udává dobu přeměn austenitu za při konstantní teplotě. Diagram ARA (anizotermický rozpad austenitu) udává dobu přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování. Při hašení seníku docházelo k tomu, že na rozžhavenou konstrukci byla stříkána voda a tímto rychlým ochlazováním mohlo dojít ke vzniku martenzitických struktur v materiálu. Pro tyto podmínky, kdy dochází k postupnému ochlazování materiálu, (ochlazování určitou rychlostí) se používá diagram ARA. Chemické složení použité oceli 11 373 je uvedeno v tab. 1. Teploty přeměn u této oceli jsou:  $A_{c1} \approx 710^\circ\text{C}$  až  $720^\circ\text{C}$  a  $A_{c3} \approx 830^\circ\text{C}$  až  $860^\circ\text{C}$ . To znamená, že pokud se předpokládána teplota při požáru pohybovala v rozmezí  $600^\circ\text{C}$  až  $800^\circ\text{C}$ , mohlo v materiálu docházet k částečné austenitizaci (teploty mezi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ ). Z obr. 20 lze vyčíst, že pro obsah uhlíku 0,17% jsou teploty  $M_s \approx 420^\circ\text{C}$  a  $M_f \approx 300^\circ\text{C}$ . Další podmínky pro martenzitickou transformaci by bylo možné vyčíst v diagramu ARA.

ocel	Chemické složení [hm. %]					
	C	Mn	Si	Cr	P	S
11 373	max. 0,17	-	-	-	max. 0,045	max. 0,045
11 483	0,18	1,12	0,51	0,18	0,28	0,20

Tab. 1: Chemické složení ocelí 11 373 a 11 483

Vzhledem k tomu, že se nepodařilo dohledat ARA diagram přesně pro ocel 11 373, bylo provedeno přibližné srovnání s ARA diagramem oceli 11 483, který je na obr. 22. Chemické složení oceli 11483 je v tab. 1. Ve srovnání s ocelí 11 373 má 11 483 má téměř stejný obsah uhlíku a pouze vyšší obsah manganu, křemíku a chromu. ARA diagram pro ocel 11 373 by tedy měl být z hlediska tvaru velmi podobný ARA diagramu oceli 11 483. Díky tomu, že ocel 11 373 je na rozdíl od 11 483 ochuzena o přídavek manganu, křemíku a chromu, by byly křivky v ARA diagramu oceli 11 373 posunuty ještě více doleva, což by znamenalo, že aby

došlo v materiálu k martenzitické transformaci, musel by být žárem vyhřátý materiál ochlazen zhruba o 300°C v čase daleko menším než jedna sekunda. Dosáhnout takové rychlosti ochlazování bylo v daných podmínkách prakticky nemožné. Toto zjištění jenom potvrzuje fakt, že oceli třídy 11 se obecně považují za nekalitelné a obavy o možný vznik křehkých martenzitických struktur tak byly v podstatě zbytečné [18].



Obr. 22: ARA diagram oceli 11 483

## 8.4 Důsledky tepelného ovlivnění

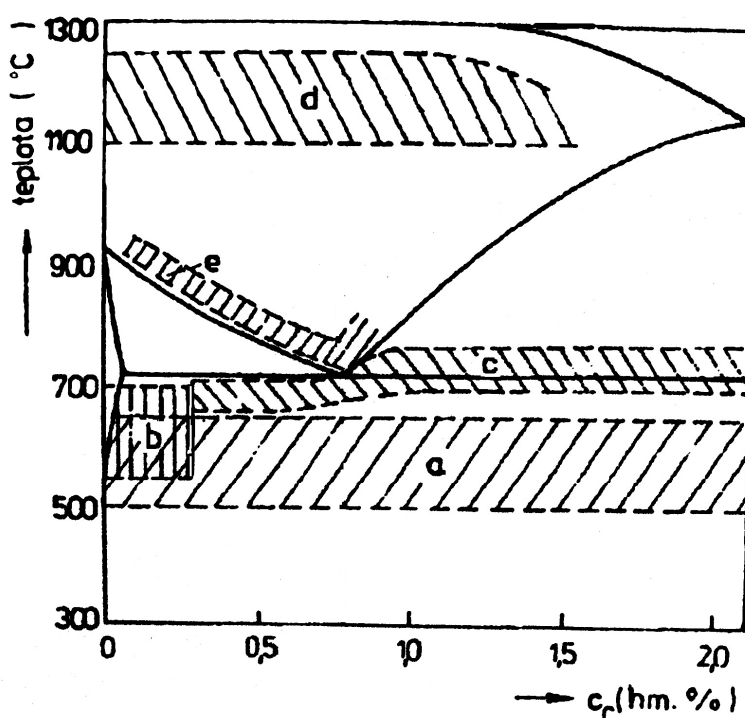
Jak je vidět na obr. 23, tak v případě materiálu 11 373 s obsahem uhlíku 0,17%, ze kterého byla zbudována střešní konstrukce a za předpokladu, že na ní nebyla dosažena teplota vyšší než 800°C, připadá do úvahy pouze možnost tepelného ovlivnění v důsledku rekrystalizačního žíhání, žíhání ke snížení pnutí a žíhání naměkko.

Obavy z poškození vlivem žíhání ke snížení pnutí se v tomto případě jeví jako naprosto zbytečné, neboť i kdyby k těmto procesům došlo, daly by se spíše u svařované konstrukce považovat za prospěšné.

Jak je zřejmé z obr. 23, při požáru mohlo dojít ale i k rekrystalizačnímu žíhání. Rekrystalizační žíhání se většinou používá k odstranění deformačního zpevnění po tváření. Při rekrystalizaci dochází k vytváření nových zárodků zrn téže krystalické mřížky, které pak postupně rostou, až vznikne nová struktura tvořená nedeformovanými zrny. Tato nová zrna s rostoucí teplotou a časem postupně rostou a to tak, že hranice větších zrn se posouvá, a tak jsou pohlcována menší zrna. Velikost zrna přímo souvisí s pevností materiálu. Obecně lze konstatovat, že čím je ocel jemnozrnější, tím vyšší má pevnostní a nižší deformační charakteristiky.

Poslední zmiňovaná možnost tepelného ovlivnění materiálu – žíhání naměkko spočívá v globularizaci perlitických lamel cementitu. V souvislosti s tímto tepelným zpracováním by se dala očekávat změna pevnostních charakteristik. Vzhledem k obsahu uhlíku v námi sledovaném materiálu (při 0,17% C se dá očekávat struktura feriticko perlitická s cca 25% perlitu) by však změna mechanických vlastností (s ohledem na množství perlitické fáze) nebyla v daných souvislostech nikterak fatální. O přesné morfologii perlitické fáze se vyšetřovací zpráva nezmiňuje. Nelze tedy vyloučit mírné snížení pevnostních vlastností konstrukce v důsledku globularizace perlitického cementitu.

Vzhledem k tomu, že z výsledků vyšetřování vyplynulo, že se velikost zrna ani původní feriticko-perlitická struktura u materiálu vystaveného požáru prokazatelně nezměnily, lze konstatovat, že pevnostní charakteristiky materiálu konstrukce nebyly požárem nikterak ovlivněny [18].



Obr. 23: Znázornění žíhacích teplot v diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, žíhání: a – ke snížení pnutí, b – rekrytalizační, c – na měkko, d – homogenizační, e – normalizační [18]

## 9. Závěr

V dnešní době patří k nejčastějším příčinám veškerých havárií především selhání lidského faktoru a to hlavně z důvodu nepozornosti, neznalosti nebo v nejhorším případě záměrného nedodržování předpisů. Často tak jen kvůli ekonomickým nebo jiným zájmům bývá zanedbávána údržba, dochází k přetěžování strojů nebo jsou porušovány nejrůznější předpisy a nařízení. Různé vady a poruchy pak bývají mnohdy špatně opraveny nebo v horším případě jen nějak zamaskovány, a proto bývá často ohrožena nejen celá konstrukce, ale mnohdy i zdraví a životy lidí. Při návrhu a provozování jakékoliv konstrukce je tak třeba brát do úvahy možnosti, co by se mohlo stát v případě selhání některé součástky. Je tedy jasné, že jiný přístup k bezpečnosti bude u zařízení, kde v případě havárie může dojít k velkým materiálním škodám nebo dokonce ztrátám na životech, a odlišný náhled na bezpečnost bude u součástí, jejichž poškození bude znamenat pouze menší hmotnou škodu.

Bezesporu jednou z nejčastějších příčin havárií, které lze jednoznačně přičíst materiálu, je selhání v důsledku únavového poškození materiálu. To vyplývá především ze způsobu namáhání konstrukcí, kdy se neustále cyklicky mění velikost nebo směr zatěžení dané součásti. Únavové poškození má kumulativní charakter a na rozdíl od jiných typů poškození (např. křehký lom) nedochází k poškození a destrukci v rekordně krátkém čase. Z tohoto hlediska se tedy jeví jako relativně „přátelský“ postupný druh poškozování a destrukce materiálu, na jehož odhalení máme poměrně dost času.

Únavu materiálu lze s pomocí moderních přístrojů snadno odhalit a hrozící nebezpečí dokonce s předstihem předvídat. Dalšími častými příčinami havárií, které souvisejí ať přímo nebo nepřímo s materiálem výrobku, mohou být například koroze, náhlé přetížení součástí, poškození vlivem vibrací, kavitace, eroze, a jiné.

## 10. Seznam použitých zdrojů

- [1] Železniční neštěstí v Eschede. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 21. 3. 2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BD%C4%8Dn%C3%AD\\_ne%C5%A1t%C4%Bst%C3%AD\\_v\\_Eschede](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BD%C4%8Dn%C3%AD_ne%C5%A1t%C4%Bst%C3%AD_v_Eschede)>.
- [2] Derailment at Eschede. *Http://www.wikia.com* [online]. 2009, 11.9.2011 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <[http://secondsfromdisaster.wikia.com/wiki/Derailment\\_at\\_Eschede](http://secondsfromdisaster.wikia.com/wiki/Derailment_at_Eschede)>.
- [3] RICHARD, H.A., M. FULLAND, M. SANDER a G. KULLMER. Fracture in a rubber-sprung railway wheel. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2005, roč. 12, č. 6, s. 986-999 [cit. 2012-05-16]. ISSN 13506307. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.016. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630705000270>>.
- [4] Letecké katastrofy: Osudná vrtule. *Http://www.ceskatelevize.cz* [online]. 1.9.2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.ceskatelevize.cz/porady/10158090296-letecke-katastrofy/207382540560004-osudna-vrtule/>>.
- [5] Accident Photo Gallery. *Http://www.airdisaster.com* [online]. ©1997-2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.airdisaster.com/photos/ase529/photo.shtml>>.
- [6] Letecké katastrofy: Na vlásku. *Http://www.ceskatelevize.cz* [online]. 22.9.2010 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/10158090296-letecke-katastrofy/207382540560007-na-vlasku/>
- [7] ALOHA FLIGHT 243: Aloha Flight 243 - Air Disaster. *Http://www.aloha.net/~icarus/* [online]. © 1997 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.aloha.net/~icarus/>>.
- [8] *Aircraft Accident Report: Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, near Maui, Hawaii, April 28, 1988* [online]. 14.6.1989, 262 s. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.airdisaster.com/reports/ntsb/AAR89-03.pdf>>.
- [9] PANTĚLEJEV, Libor. *Únava kovových materiálů*. Opory pro výuku předmětů na ÚMVI [online]. 2005 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.doc>>.
- [10] Aluminum 7075-T73; 7075-T735x. *MatWeb* [online]. ©1996-2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=6653b72914864cc0a0ff7adf5b720167&ckck=1>>.
- [11] PTÁČEK, Luděk a kol. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

- [12] ESSLINGER, Volker, Rolf KIESELBACH, Roland KOLLER a Bernhard WEISSE. The railway accident of Eschede - technical background. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2004, roč. 11, č. 4, s. 515-535 [cit. 2012-05-16]. ISSN 13506307. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2003.11.001. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630704000214>>.
- [13] Letecké katastrofy: Tragédie bez zjevné příčiny. [Http://www.ceskatelevize.cz](http://www.ceskatelevize.cz) [online]. 13.6.2011 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.ceskatelevize.cz/porady/10158090296-letecke-katastrofy/209382545080008-tragedie-bez-zjevne-priciny/>>.
- [14] Convair CV-580 LN-PAA Cologne/Bonn Konrad Adenauer Airport - EDDK. MEYERMANN, Ralf. [Http://jetphotos.net/](http://jetphotos.net/) [online]. 2004 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <<http://jetphotos.net/viewphoto.php?id=221052>>.
- [15] *Report on the Convair 340/580 LN-PAA aircraft accident North of Hirtshals, Denmark on September 8, 1989* [online]. 12.2.1993 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.aibn.no/aviation/reports/1993-02-eng>>.
- [16] V Soběrazi hořel velkokapacitní seník. Na místě zasahovalo několik jednotek hasičů. [Http://www.jicinskozpravy.cz/](http://www.jicinskozpravy.cz/) [online]. 11.09.2007 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <<http://www.jicinskozpravy.cz/archiv/zpravy/2007/48/1827-v-soberazi-horel-velkokapacitni-senik-na-miste-zasahovalo-nekolik-jednotek-hasicu.htm>>.
- [17] VAŠEK, Milan. *Havárie, poruchy a rekonstrukce: dřevěné a ocelové konstrukce*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 191 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3526-9.
- [18] PTÁČEK, Luděk a kol. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- Citace.com* [online]. ©2004-2012 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <<http://generator.citace.com>>.



## 11. Seznam použitých symbolů a zkratek

$\sigma$	[MPa]	Napětí
$\sigma_a$	[MPa]	Amplituda napětí
$\sigma_c$	[MPa]	Mez únavy
$\sigma_{Nc}$	[MPa]	Časovaná mez únavy
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$A_{c1}$	[°C]	Eutektoidní teplota
$A_{c3}$	[°C]	Teplota počátku vylučování feritu z austenitu
$c$	[m]	Kritické velikost trhliny
$c_c$	[hm. %]	Obsah Uhlíku
HB	[-]	Tvrдость podle Brinnela
HV	[-]	Tvrдость podle Vickerse
HV5	[-]	Tvrдость podle Vickerse při zatížení 49,03 N
$K_c$	[MPa·m <sup>1/2</sup> ]	Kritická hodnota součinitele intenzity napětí
$\Delta L$	[m]	Prodloužení trhliny
$M_s$	[°C]	Teplota počátku tvorby martenzitu
$M_f$	[°C]	Teplota konce tvorby martenzitu
$N_f$	[-]	Počet cyklů do lomu
$N_c$	[-]	Počet cyklů do lomu při časované mezi únavy
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$T$	[°C]	Teplota
ARA		anizotermický rozpad austenitu
IRA		izotermický rozpad austenitu